

*Bieske, Karin; Michl, Johannes; Stubenrauch, Nicole; Schierz, Christoph;
Frohnepfel, Anja; Wilm, Alexander*

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs?

URN: [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017200442](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2017200442)

Original published in:

Licht 2016 : Karlsruhe, 25.-28. September : Tagungsband - Proceedings. - Karlsruhe:
KIT Scientific Publishing. - (2016), p. 709-716.

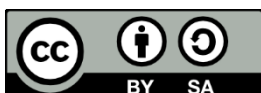
Original published: 2016

ISBN: 978-3-7315-0564-8

URN: [urn:nbn:de:0072-578170](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0072-578170)

DOI: [10.5445/KSP/1000057817](https://doi.org/10.5445/KSP/1000057817)

[Visited: 2017-08-18]



This document – excluding the cover, pictures and graphs –
is licensed under the Creative Commons Attribution-Share
Alike 3.0 DE License (CC BY-SA 3.0 DE)
<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/>

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs?

Bieske, K.; Michl, J.; Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau; Frohnäpfel, A., Zumtobel Lighting GmbH; Wilm, A., OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Problemstellung und Forschungsfragen

Untersuchungen haben gezeigt, dass standardisierte Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964 bei LED-Spektren zu Metamerie-Brüchen führen können, trotz messtechnisch gleicher Farbörter (Metamerie) werden Lichtfarbenunterschiede erkannt. Basierend auf umfangreichen Arbeiten mit LED-Spektralkombinationen für weiße LED-Lichtfarben gibt es von POLSTER Vorschläge für neue Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2° und 2006-TUIL-10°. Bieten diese Funktionen Ansätze zur Optimierung des Binnings von LED?

Stand der Wissenschaft/Technik

Standard für die farbmetrische Messung von LED und das LED-Binning sind die CIE-1931-Normspektralwertfunktionen. Je nach Spektralverteilung sind für weiße LED mit identischen Farbkoordinaten für visuelle Gleichheit der Lichtfarben Farbraumfehler bis zu $\Delta u'v' = 0,0165$ von POLSTER beschrieben worden. Die Farbdiskriminationsschwelle für weiße LED-Lichtfarben liegen nach KRAMER zwischen $\Delta u'v' = 0,0004$ bis $\Delta u'v' = 0,0018$. Die beobachteten Lichtfarbenunterschiede sind zum Teil deutlich auffällig und führen in praktischen Anwendungen zu nicht akzeptierbaren Farbunterschieden.

Forschungshypothesen

Die neu vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen nach POLSTER modellieren die Farbwahrnehmung von weißen LED-Lichtquellen in praxisrelevanten Anwendungen bei Leuchten besser und führen zu weniger Metamerie-Brüchen. Altersabhängige Veränderungen des Auges müssen bei der Modellierung der Farbwahrnehmung berücksichtigt werden.

Versuchsaufbau

Basierend auf der Simulation möglicher Variationen im Spektrum durch den Herstellungsprozess wurden LED-Typen bezüglich Metamerie-Brüche ausgewählt, gefertigt und messtechnisch charakterisiert. 10 LED-Typen wurden in Lichtboxen mit einer Streuscheibe und in handelsübliche Strahler verbaut und visuell durch 20 jüngere (< 35 Jahre) und 20 ältere (> 60 Jahre) Probanden hinsichtlich der Lichtfarbenunterschiede bei direkter und indirekter Beobachtung bewertet. Die gemessenen Spektralverteilungen wurden mit verschiedenen Spektralwertfunktionen verrechnet, Farbabstände zwischen den unterschiedlichen LED-Typen bestimmt und mit den visuellen Urteilen der Probanden verglichen. Altersbedingte Änderungen der Farbwahrnehmung wurden mit betrachtet.

Ergebnisse im Vergleich mit bisherigen Ergebnissen

Erste Ergebnissen deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL-2°/2006-TUIL-10° die Farbwahrnehmung zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren möglich ist. Derzeit sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen und umfänglich ausgewertet.

Approaches to optimize the Binning of white LEDs?

Bieske, K.; Michl, J.; Stubenrauch, N.; Schierz, Ch., Technische Universität Ilmenau; Frohnapfel, A., Zumtobel Lighting GmbH; Wilm, A., OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Research Issues

Studies have revealed inconsistency of metamerism. Large colour differences are perceived between LEDs even though the colour coordinates are identical when the colour-matching functions of the CIE standard of 1931 and of 1964 are used for the calculations. On the basis of numerous colour matching experiments POLSTER has suggested new colour matching functions (2006-TUIL-2° and 2006-TUIL-10°). Do these serve to model human perception better? Might they be a means of optimising the binning of white LEDs?

State of the Art

Currently, the colour-matching functions of the CIE standard observer of 1931 are the standard for general colorimetry and for the binning of white LEDs. POLSTER found colour differences between visually matched LED spectra and the results of calculations based on the CIE 1931 colour-matching functions up to $\Delta u'v' = 0.0165$. KRAMER investigated which differences in luminous colours are just noticeable. The threshold values he found are in the range between $\Delta u'v' = 0.0004$ and $\Delta u'v' = 0.0018$. In some cases, the visible differences in luminous colour are so clearly perceptible that users find them unacceptable.

Hypotheses

The colour-matching functions recommended by POLSTER are more successful in modelling the perception of luminous colours of white LEDs in common use, so that less inconsistency arises due to metamerism. Age-related changes in the human eye must be taken account of in the modelling procedure for variation in how appearance is perceived.

Experimental Setup

Having used simulation to establish the possibility of variation in the spectral distribution due to the manufacturing procedure, we selected 10 LED types which were likely to be relevant in a study of inconsistency of metamerism, had them manufactured and then characterised them by colorimetry. We fitted them into luminaires and in boxes with diffusers. They were then evaluated by 20 young (< 35 years) people and 20 older (> 60 years) people, who rated the luminous colour differences they perceived in the 23 LED-combinations tested. The measured spectral distributions were weighted in respect of the different colour-matching functions, the colour coordinates were determined and the colour difference for each combination of LEDs was calculated. Besides comparing the calculated colour differences with the subjective ratings of the participants in the experiment, we also focused on the changes in colour perception attributable to ageing.

Results

Initial indication is that the colour-matching functions recommended by POLSTER model colour perception better than the standard procedure used to date. The investigations are continuing and the results are being analysed in detail.

Ansätze zur Optimierung des Binnings weißer LEDs?

Bieske, K.¹; Michl, J.¹; Stubenrauch, N.¹; Schierz, Ch.¹; Frohnappfel, A.²; Wilm, A.³

¹Technische Universität Ilmenau ; ²Zumtobel Lighting GmbH; ³OSRAM Opto Semiconductors GmbH

Dr.-Ing. Karin Bieske, TU Ilmenau, Fak. MB, FG Lichttechnik, PF 100565 98684 Ilmenau

Zusammenfassung

Das bisherige Binning-Verfahren für LEDs basiert auf den CIE-1931-Normspektralwertfunktionen. Jedoch zeigen sich in der Praxis trotz messtechnisch gleicher Farbörter zum Teil deutliche Lichtfarbenunterschiede. Von POLSTER sind neue Spektralwertfunktionen vorgeschlagen worden, die die Farbwahrnehmung besser modellieren. Im Laborversuch wurden ausgewählte LED-Typen in realitätsnahen Aufbauten dargeboten und von Probanden bewertet. Der Vergleich der subjektiven Probandenbewertung mit den rechnerischen Farbabständen $\Delta u'v'$ liefert eine Aussage über die Eignung der untersuchten Spektralwertfunktionen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUIL die Farbwahrnehmung zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren möglich ist.

1 Einleitung und Stand der Wissenschaft

LEDs (Licht emittierende Dioden) haben sich in vielen Bereichen der Beleuchtungstechnik etabliert. Dabei werden oft mehrere LEDs in einem Beleuchtungssystem verbaut. Wesentlich für die Qualität der Beleuchtung ist ein homogenes Erscheinungsbild in Leuchtdichte und Lichtfarbe innerhalb und zwischen Leuchten. Toleranzen im Herstellungsprozess und im Betrieb von LEDs führen zu Varianzen in Spektralverteilung und Lichtfarbe [1]. Deren Kontrolle macht eine fotometrische und farbmetrische Charakterisierung und Klassifizierung (Binning) der LEDs erforderlich. Standard für die farbmetrische Messung von LEDs und das LED-Binning sind die CIE-1931-Normspektralwertfunktionen [2].

In Untersuchungen zeigten sich jedoch Schwierigkeiten bei der Modellierung der Farbwahrnehmung auf Basis der standardisierten Normspektralwertfunktionen der CIE von 1931 und 1964. Trotz messtechnisch gleicher Farbörter werden Lichtfarbenunterschiede erkannt [3],[4]. Je nach Spektralverteilung sind für weiße LED mit identischen Farbkoordinaten bewertet mit den Normspektralwertfunktionen 1931 für visuelle Gleichheit der Lichtfarben Farbraumfehler bis zu $\Delta u'v' = 0,0165$ von POLSTER beschrieben worden [5]. Die Farbdiskriminationsschwelle für weiße LED-Lichtfarben liegen nach KRAMER zwischen $\Delta u'v' = 0,0004$ bis $\Delta u'v' = 0,0018$ [6]. Die beobachteten Lichtfarbenunterschiede sind zum Teil deutlich auffällig und führen in praktischen Anwendungen zu kritisierten Farbunterschieden.

Basierend auf umfangreichen Arbeiten mit LED-Spektralkombinationen für weiße Lichtfarben gibt es von POLSTER Vorschläge für neue Spektralwertfunktionen: 2006-TUIL 2° und 2006-TUIL 10° [5]. Wenn durch diese Spektralwertfunktionen die Farbwahrnehmung von LED-Lichtquellen verlässlicher beschreibbar ist, bieten diese Ansätze zur Optimierung des Binnings von LED.

Die Farbwahrnehmung wird durch viele Faktoren beeinflusst. Neben dem Sehobjekt selbst und den Beobachtungsbedingungen, spielen individuelle Unterschiede zwischen Beobachtern eine Rolle. Eigenschaften der Linse und der Schicht des Makulapigments, die Dichte des Photopigments sowie die Anzahl und Verteilung der Rezeptoren in der Retina variieren zwischen Personen [7],[8]. Interindividuelle Unterschiede sowie altersabhängige Bewertungen liegen nahe und werden in Auswertung der Untersuchung mit betrachtet.

2 Forschungshypothesen

Ziel der Untersuchung ist es, unterschiedliche Spektralwertfunktionen auf ihre Eignung für die Modellierung der Farbwahrnehmung zu testen. Dabei wird von folgenden Hypothesen ausgegangen:

1. Die neu vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen nach POLSTER modellieren die Farbwahrnehmung von weißen LED-Lichtquellen in praxisrelevanten Anwendungen bei Leuchten besser.
2. Bei der Bewertung von Lichtfarbenunterschieden zeigen sich Unterschiede in Abhängigkeit vom Alter.

3 Untersuchungen

Basierend auf der Simulation möglicher Variationen im Spektrum durch den Herstellungsprozess für weiße leuchtstoffkonvertierte LEDs mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von $CCT = 4000\text{ K}$ wurden LED-Typen bezüglich ihrer Farbortunterschiede bei Verwendung unterschiedlicher Spektralwertfunktionen ausgewählt, gefertigt und messtechnisch charakterisiert. Dabei wurden die Normspektralwertfunktionen CIE 1931 und CIE 1964, die Spektralwertfunktionen CIE 2006 2° und 10° , sowie die von POLSTER vorgeschlagenen Spektralwertfunktionen 2006-TUIL 2° und 2006-TUIL 10° einbezogen [9],[10],[5]. Außerdem wurden auf Grundlage von CIE 170-1 Spektralwertfunktionen für ein Alter von 60 Jahren berechnet [10]. Ausgewählt wurden solche Spektren, die in den Bewertungssystemen verschiedene Lichtfarbenunterschiede vorhersagen. Zehn unterschiedliche LED-Typen konnten gefertigt werden und wurden vom Hersteller für unterschiedliche Betriebsbedingungen charakterisiert. Diese wurden in praxisnahe Versuchsaufbauten integriert. Anhand von Probandenurteilen werden die Vorhersagen überprüft.

3.1 Versuchsaufbau

Die LED-Typen wurden in Lichtboxen mit einer Streuscheibe (Lichtaustrittsfläche $300\text{ mm} \times 300\text{ mm}$) und in handelsübliche Strahler (ZUMTOBEL VIVO L LED) verbaut. Den Versuchsaufbau für beide Situationen zeigt Abb. 1.

In einem Laborraum ($l = 6,6\text{ m}$, $b = 4,2\text{ m}$, $h = 2,8\text{ m}$) werden jeweils zwei benachbarte Lichtboxen vor einer beleuchteten Projektionswand ($2\text{ m} \times 2\text{ m}$) den Probanden in einer Entfernung von $1,7\text{ m}$ dargeboten. Dies entspricht einer Beobachterfeldgröße von 10° . Die Beobachterposition ist über eine Kopfstütze fixiert. Das Umfeld ($\approx 40^\circ$) wird über Leuchten mit Leuchtstofflampen ($CCT = 3500\text{ K}$, angepasst an die resultierende ähnlichste Farbtemperatur der Lichtboxen) mit einer mittleren Leuchtdichte von $L = 200\text{ cd/m}^2$ gleichmäßig beleuchtet.

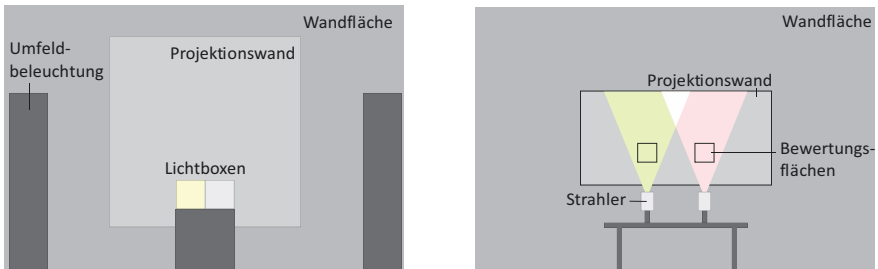


Abb. 1: Schema der Versuchsaufbauten im Laborraum für die Beurteilung der Lichtfarbenunterscheide an Lichtboxen links und zur Bewertung der Strahler rechts

In umfangreichen Messungen wurden Einflüsse der Lichtboxen auf Spektralverteilung der LED, Homogenität, zeitliche Stabilität und Reproduzierbarkeit der Lichtfarbe untersucht und optimiert. Innerhalb der Lichtbox wurden die Gleichmäßigkeit für die Leuchtdichte und die Lichtfarbe an 15 Messpunkten gemessen. Verwendet wurden dafür die Leuchtdichte- und Farbmesskamera LMK 98-4 color (TechnoTeam) sowie das Spektralradiometer CS 2000A (Minolta). Die Lichtboxen weisen Leuchtdichten von $L = 800 \pm 93 \text{ cd/m}^2$ ($MW \pm \sigma$) auf. Die Standardabweichung um den Mittelwert des Farborts beträgt $\Delta u' = \pm 0,0003$ und $\Delta v' = \pm 0,0005$. Zwischen benachbarten Boxen lagen die Unterschiede in der Leuchtdichte bei maximal $\Delta L = 56 \text{ cd/m}^2$ (7%). Grenzen sind durch die Ansteuerung über das DALI-Protokoll gegeben.

Die Bewertung der Strahler erfolgt innerhalb des Lichtkegels auf einer Projektionsfläche, die mit mattweißem, aselectivem Canson-Papier bezogen ist. Die Leuchten sind dabei vertikal ausgerichtet und beleuchten die Projektionsfläche von unten. Die Beobachterentfernung der Probanden beträgt 1,3 m. Das Bewertungsfeld je Strahler (200 mm x 200 mm) ist für eine Beobachterfeldgröße von 10° definiert und auf der Projektionsfläche markiert. Es wurde so gewählt, dass störende Inhomogenitäten innerhalb der Bewertungsfäche vermieden werden. Durch den graduellen Verlauf sind sie tolerierbar. Die Messwerte innerhalb der Bewertungsfelder liegen bei Leuchtdichten von $L = 350 \pm 60 \text{ cd/m}^2$ ($MW \pm \sigma$) und streuen für die Farbkoordinaten um $\Delta u' = \pm 0,0002$ $v' = \pm 0,0008$. Der maximal zwischen zwei Strahlern auftretende Leuchtdichteunterschied liegt bei $\Delta L = 11 \text{ cd/m}^2$ (3%).

3.2 Probanden

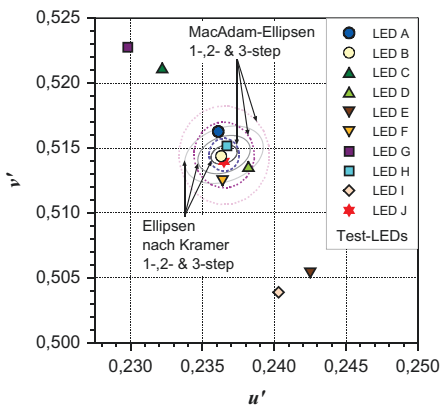
An der Untersuchung nahmen 40 Probanden, darunter 20 Frauen teil. Die Gruppe setzt sich aus 20 jüngeren (< 35 Jahre) und 20 älteren (> 60 Jahre) Personen zusammen. Die Probanden wurden vorab auf Farbtüchtigkeit und Sehschärfe geprüft. Personen mit ausgeprägten Augenkrankheiten (z.B. grauer Star) und früheren Augenoperationen (z.B. Einsatz einer künstlichen Linse) wurden von der Untersuchung ausgeschlossen.

3.3 Methode

Den Probanden wurden 23 LED-Kombinationen je Versuchssituation in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Einzelne Kombinationen wurden für die Erfassung der Reproduzierbarkeit der Bewertungen wiederholt getestet. Es werden diejenigen Kombinationen geprüft, die nach dem bisherigen Binning-Verfahren keinen oder nur einen kleinen Farbabstand

aufweisen dürften. Außerdem werden alle weiteren Kombinationen untersucht, die bei Bewertung mit einer anderen Spektralwertfunktion einen kleinen Farbunterschied vorher-sagen.

Zur Bestimmung des resultierenden Farborts der Lichtboxen und der mit den Strahlern beleuchteten Flächen wurde jeweils der Messwert im Mittelpunkt der Bewertungsfläche verwendet. Abb. 2 zeigt die Verteilung der Farbortkoordinaten in der UCS $u'v'$ -Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931. Zur Orientierung sind die MacAdam-Ellipsen und die 2015 an der TU Ilmenau bestimmten Ellipsen nach KRAMER [6] eingezeichnet. Das bisherige Binning-Verfahren orientiert sich üblicherweise an 3-Step MacAdam-Ellipsen. Die Farbörter der LED-Typen B, H und J befinden sich innerhalb der 1-Step-Ellipsen. Die Lichtfarben dieser Typen sollten voneinander nicht unterscheidbar sein. Für ausgewählte Kombinationen sind die berechneten Farbabstände $\Delta u'v'$ beispielhaft für unterschiedliche Spektralwertfunktionen und Altersgruppen in der Tabelle neben der Abbildung zusammengefasst.



Farbabstand $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED- Kombinationen auf Grundlage unterschiedlicher Spektralwert-funktionen und Altersgruppen nach [5],[9]

LED-Kom-bination	CIE 1931	2006-TU1L 10 ^s	2006-TU1L 10 ^s 60 Jahre
BH	0,0009	0,0016	0,0007
BJ	0,0005	0,0084	0,0056
HJ	0,0012	0,0100	0,0058
GJ	0,0111	0,0019	0,0048
FJ	0,0015	0,0022	0,0021
AB	0,0019	0,0013	0,0011

Abb. 2: Farbörter der Lichtboxen in der UCS $u'v'$ -Farbtafel auf Grundlage der Normspektralwertfunktionen CIE 1931. Außerdem eingezeichnet: MacAdam-Ellipsen und Ellipsen nach KRAMER [6] mit Ellipsenschwerpunkt im Mittelwert der Farbortkoordinaten der verwendeten LED-Typen B, H und J (links) und berechnete Lichtfarbenunterschiede $\Delta u'v'$ für ausgewählte LED- Kombinationen (rechts)

Der Farbabstand wurde für die getesteten Kombinationen nach Gleichung (1) bestimmt:

(1)
$$\Delta u'v' = \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2}$$

Jede Kombination der Lichtfarbe wurde von den Probanden anhand der Bewertungsskala (Abb. 3) bewertet.

0	1	2	3	4	5	6	7	8
kein Unterschied		gerade erkennbar		kleiner Unterschied		großer Unterschied		sehr großer Unterschied

Abb. 3: Skala zur Bewertung der gesehenen Lichtfarbenunterschiede

4 Ergebnisse

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrags waren die Untersuchungen nicht abgeschlossen, sodass sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine endgültigen Ergebnisse darstellen lassen. Abb. 4 und Abb. 5 zeigen erste Resultate. Dargestellt sind Mittelwerte (MW) und Standardabweichung (σ) für die subjektiven Bewertungen der Lichtfarbenunterschiede für die untersuchten Lichtfarbenkombinationen in den Lichtboxen und bei den Strahlern für 11 Probanden. Die dargestellten Trendlinien basieren auf den Bewertungen aller Probanden für alle LED-Kombinationen (nicht auf den Mittelwerten). Darauf beziehen sich auch die angegebenen Bestimmtheitsmaße R^2 .

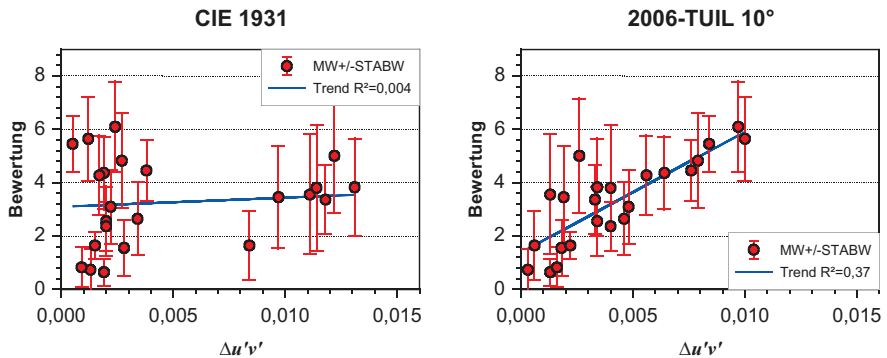


Abb. 4: Subjektiv wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Lichtboxen beurteilt nach Bewertungsskala in Abb. 3, (MW \pm σ , 11 Probanden)

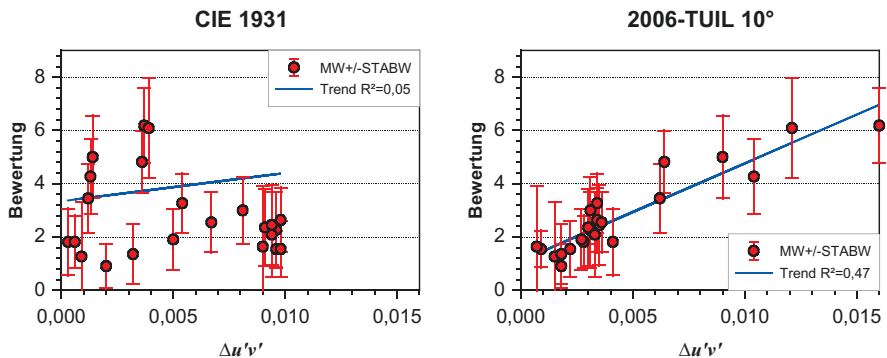


Abb. 5: Subjektiv wahrgenommene Lichtfarbenunterschiede zwischen den Bewertungsflächen der Strahler beurteilt nach Bewertungsskala in Abb. 3, (MW \pm σ , 11 Probanden)

Beschreibt die verwendete Spektralwertfunktion die Farbwahrnehmung hinreichend korrekt, ist zu erwarten, dass mit größer werdenden Farbabweichungen $\Delta u'v''$, der subjektiv wahrgenommene Farbunterschiede und damit die Bewertung ansteigt. Erwartet wird eine hohe Korrelation der Daten.

Die ersten Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Spektralwertfunktionen 2006-TUILL 10° die Farbwahrnehmung in realitätsnahen Versuchsaufbauten für weiße Leuchtstoffkon-

tierte LED-Lichtquellen zum Teil besser modellieren als dies mit dem standardisierten Verfahren nach CIE 1931 möglich ist. Aussagen über den Alterseinfluss in der Untersuchung sind bisher nicht möglich, da die Daten zu diesem Aspekt noch nicht analysiert wurden.

5 Zusammenfassung

Zum jetzigen Stand der Auswertung wird von der Bestätigung der These 1 ausgegangen. Auf Basis des bisherigen Binning-Verfahrens sind auffällige Lichtfarbenunterschiede trotz ähnlicher Farbörter für die LED-Auswahl in der Anwendung nicht auszuschließen.

Die Untersuchung fand in enger Zusammenarbeit mit den Praxispartnern OSRAM Opto Semiconductors GmbH und Zumtobel Lighting GmbH statt und wurde im Rahmen des Projektes UNILED II (Förderkennzeichen: 13N13395) vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Krückeberg, J.: HochleistungsLEDs in der Praxis. Franzis Verlag. 2007.
- [2] ANSI_NEMA_ANSI C78.377-2008. American National Standard for Electric Lamps. Specifications for the chromaticity of solid state lighting products; 2008.
- [3] Bieske, K.; Csuti, P.; Schanda, J.: Colour appearance of metameric lights and possible colorimetric description CIE Expert Symposium on Visual Appearance Paris 2006.
- [4] Csuti, P.; Schanda, J.: Colour Matching Experiments with RGB-LEDs. In: Color Research and Application 33 (2008), S. 108-112.
- [5] Polster, S.: Neue Spektralwertfunktionen für die korrekte Bewertung von LED-Spektren und Einführung eines Metamerie-Index für Beobachterfeldgrößenabhängigkeit. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.
- [6] Kramer, G.: Farbdiskrimination - Ein empirischer Ansatz für die Gruppierung weißer LEDs. Dissertation TU Ilmenau. Der Andere Verlag. 2014.
Kramer, G., Schierz, Ch.: Color discrimination subject to illuminant and color transition. Color Research and Application (2015), DOI: 10.1002/col.21979.
- [7] Stockman, A.; Sharpe, L.: Cone spectral sensitivities and color matching. In: Gegenfurtner, K. (Hrsg.); Sharpe, L. (Hrsg.): Color vision: from genes to perception. Cambridge University Press, 1999, S. 53–87.
- [8] Webster, M.; MacLeod, D.: Factors underlying differences in the color matches of normal observers. In: Journal of the Optical Society of America A 5 10 (1988), S. 1722–1735.
- [9] Deutsches Institut für Normung: Farbmeterik - Teil 1. CIE farbmeterische Normalbeobachter. DIN EN ISO 11664-1, Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [10] Commission Internationale de L'eclairage: Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes. Technical Report CIE 170-1:2006. Wien. 2006.